

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

1960~2013 年我国霾污染的时空变化	符传博,唐家翔,丹利,何媛 (3237)
太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征	王璐,温天雪,苗红妍,高文康,王跃思 (3249)
石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征	刘景云,刘子锐,温天雪,魏俊龙,黄小娟,乔宝文,王莉莉,杨洋,徐仲均,王跃思 (3258)
南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析	吴丹,曹双,汤莉莉,夏俊荣,陆建刚,刘刚,杨孟,李凤英,盖鑫磊 (3268)
南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析	肖思晗,于兴娜,朱彬,何稼祺 (3280)
上海崇明地区大气分形态汞污染特征	李舒,高伟,王书肖,张磊,李智坚,王龙,郝吉明 (3290)
三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量	王永敏,赵铮,孙涛,王娅,薛金平,张成,王定勇 (3300)
长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析	吴方堃,孙杰,余晔,唐贵谦,王跃思 (3308)
铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征	刘大钧,汪家权 (3315)
祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究	贾文雄,李宗省 (3322)
三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价	郭威,殷淑华,徐建新,徐东昱,高丽,郝红,高博 (3333)
太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素	车霏霏,王大鹏,甄卓,颜昌宙,王灶生 (3340)
太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险	张盼伟,周怀东,赵高峰,李昆,刘巧娜,任敏,赵丹丹,李东佼 (3348)
岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析	张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,徐昕 (3356)
西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例	詹兆君,陈峰,杨平恒,任娟,张海月,刘黛薇,蓝家程,张宇 (3365)
不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析	李如忠,秦如彬,黄青飞,耿若楠 (3375)
滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献	李乐,王圣瑞,焦立新,余佑金,丁帅,王跃杰 (3384)
荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源	黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,刘飞,夏超,丛海兵 (3394)
富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析	张思敏,李云梅,王桥,朱利,王旭东,温爽 (3402)
基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例	安新丽,陈廷廷,赵晗,张又弛,侯艳伟,蔡超 (3413)
于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系	王祖伟,王伟玮,侯迎迎,包姗姗,王子璐,王倩倩 (3423)
人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响	刘佳,易乃康,熊永娇,黄翔峰 (3430)
共生细菌对盐生小球藻富集和转化硝酸盐的影响	许平平,刘聪,王亚,郑燕恒,张春华,葛滢 (3438)
模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响	王兵,温奋翔,肖波 (3447)
对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为	周琦,蒋煜峰,孙航,慕仲锋,张振国,展惠英 (3453)
多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究	尹子华,盛晓琳,刘锐,陈吕军,张永明 (3460)
某微污染水源自来水管网的纳滤深度处理效果研究	吴玉超,陈吕军,兰亚琼,刘锐 (3466)
Fe ⁰ -PRB 去除 Cr(VI) 反应动力学及影响机制	卢欣,李森,唐翠梅,辛佳,林朋飞,刘翔 (3473)
EDTA-nSiO ₂ 纳米颗粒对 Cd ²⁺ 的吸附	蒋顺成,秦睿,李满林,李荣华,张增强,Amjad Ali,梁文 (3480)
硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征	沈伟航,朱能武,尹富华,吴平霄,张彦鸿 (3488)
人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能	崔蒙蒙,王殿升,黄天寅,刘锋 (3498)
生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能	牟锐,沈志强,周岳溪,陈学民,伏小勇,谭蕾蕾,瞿畏 (3508)
甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系	刘东,张小婷,张代钧,曾善文,卢培利 (3518)
光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制	胡倩,阳海,石妮,胡乐天,易兵 (3524)
宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响	王美娥,彭驰,陈卫平 (3532)
北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价	董捷,黄莹,李永霞,张厚勇,高甫威 (3540)
红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应	贾广梅,马玲玲,徐殿斗,成杭新,周国华,杨国胜,罗敏,路雨楠,刘志明 (3547)
外源锌刺激下水稻对土壤镉的累积效应	辜娇峰,杨文骏,周航,张平,彭佩钦,廖柏寒 (3554)
改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应	杨兰,李冰,王昌全,刘倾城,张庆沛,肖瑞,李一丁 (3562)
生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果	周普雄,严颀,余震,王跃强,朱艺,周顺桂 (3575)
长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响	赵慧慧,肖娴,裴孟,赵远,梁玉婷 (3582)
应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响	曾清苹,何丙辉 (3590)
三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化	隋心,张荣涛,许楠,刘赢男,柴春荣,王继丰,付晓玲,钟海秀,倪红伟 (3598)
外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH ₄ 、CO ₂ 排放的短期影响	胡敏杰,任鹏,黄佳芳,仝川 (3606)
模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO ₂ 通量变化及其影响因素	杜兰兰,王志齐,王蕊,李如剑,吴得峰,赵慢,孙棋棋,高鑫,郭胜利 (3616)
太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性	严俊霞,郝忠,荆雪镨,李洪建 (3625)
生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响	王月玲,耿增超,王强,尚杰,曹胜磊,周凤,李鑫,刘福义,张萍 (3634)
氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响	辛月,尚博,陈兴玲,冯兆忠 (3642)
冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响	李洪建,杨艳,严俊霞 (3650)
堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究	李丹,何小松,席北斗,高如泰,张慧,黄彩红,党秋玲 (3660)
酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响	刘寒冰,杨兵,薛南冬 (3670)
《环境科学》征订启事 (3517)	《环境科学》征稿简则 (3561)
信息 (3289,3321,3422)	

人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响

刘佳, 易乃康, 熊永娇, 黄翔峰*

(同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 利用水平潜流人工湿地和下行-上行复合垂直流人工湿地净化水产养殖废水, 研究水流方式、水力停留时间对水产养殖废水中含氮污染物、抗生素等典型污染物净化效果的影响。结果表明, 复合垂直流人工湿地对含氮污染物具有较好的去除效果, 对 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率在水力停留时间为 3 d 时可分别达到 58%、80%。采用 BIOLOG 微平板技术和高通量测序对两个人工湿地入流端基质微生物群落分析发现, 复合垂直流人工湿地因其内部结构有利于水流流向及溶解氧条件使得微生物活性和多样性均较高, *Nitrospira* 属分布较多是氨氮去除效果较好的主要原因。水力停留时间对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的去除有较大影响, 维持在 3~4 d 对各类含氮污染物可获得较好的去除效果。采用固相萃取-高效液相色谱串联质谱法对抗生素去除效果进行研究发现, 人工湿地构型对抗生素的去除效果差异不大, 两种人工湿地对恩诺沙星的去除效果优于磺胺甲噁唑和氟甲砜霉素, 当水力停留时间从 1 d 延长至 3 d 可提高磺胺甲噁唑的去除率至 50% 以上。

关键词: 人工湿地; 水产养殖废水; 水流方式; 含氮污染物; 抗生素

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3430-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.09.022

Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater

LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, HUANG Xiang-feng*

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Ministry of Education Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Horizontal subsurface flow constructed wetland (HSSFCW) and integrated vertical flow constructed wetland (IVFCW) consisted of down-flow and up-flow were built to treat aquaculture wastewater under different conditions. The water treatment performance, especially the nitrogen pollutants and antibiotics removal efficiencies, were compared, and the effects of flow patterns and hydraulic retention time (HRT) on the efficiencies were studied. The results showed that IVFCW had a better removal efficiency on nitrogen pollutants, and the removal rates of TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ were 58% and 80% (HRT = 3 d), respectively. Microbial community was further analyzed using BIOLOG microplate technique and 454-pyrosequencing. The internal structure of IVFCW was conducive to the flow and dissolved oxygen condition, which induced higher microbial activity and diversity. The richness in *Nitrospira* distribution was the main reason for the removal efficiency of ammonia nitrogen. HRT had a great influence on the removal of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{NO}_2^-\text{-N}$, and maintaining 3-4 d could reach good efficiency for all kinds of nitrogen pollutants. Solid phase extraction-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry analysis (SPE-HPLC-MS/MS) was used to test the removal efficiency of antibiotics, and the results showed that there was no remarkable difference between the two configurations. The removal efficiency of Enrofloxacin was higher than that of Sulfamethoxazole and Florfenicol. Extending HRT from 1 d to 3 d could significantly improve the removal rate of Sulfamethoxazole, reaching above 50%.

Key words: constructed wetland; aquaculture wastewater; flow patterns; nitrogen pollutants; antibiotics

我国水产养殖业的迅速发展产生了大量的水产养殖废水。未经利用的饲料及水产品代谢物导致养殖废水中含有大量的含氮污染物, 若不经处理肆意排放会造成周围水域富营养化^[1]; 同时养殖过程中使用的抗生素残留在水环境中会诱导微生物产生抗药性, 并有可能对水产品产生毒害作用^[2]。目前, 高密度水产养殖业中产生的大量废水及其中所含的各类污染物和残留抗生素的处理受到越来越多的关注。

人工湿地作为一种生态处理技术, 具有投资低、

运行费用省和运行耗能低的优势^[3, 4], 已成功运用于养殖废水的处理^[5~8]。潜流人工湿地通常被分为水平潜流和垂直流, 研究表明, 水平潜流和垂直流人工湿地构造和水流方式的差别以及湿地内水力停留时间的长短, 均易导致污水与填料接触时间、湿地

收稿日期: 2016-03-29; 修订日期: 2016-04-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07101006-02)

作者简介: 刘佳(1982~), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为水污染控制工程, E-mail: liujia@tongji.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: hxf@tongji.edu.cn

内氧含量等的差异,从而影响到对污水中含氮污染物的去除效果^[9]。水平流拥有相对长距的流程,潜在的反硝化程度高^[10],而垂直流湿地内部污水从表面流至底部时能够与氧较好地混合,硝化反应好且去除较多的有机物^[11]。有学者在考察人工湿地对抗生素的去除效果时也发现,垂直流人工湿地优于水平流人工湿地^[12]。随着研究的深入,人们发现单一的水流方式不能同时提供好氧和厌氧的环境,所以构造复合人工湿地来提供不同的氧化还原状态以适宜硝化和反硝化的进行,进而改进净化污水的效果^[13, 14]。

本研究分别构建了水平潜流和下行-上行复合垂直流两种构型的人工湿地装置,考察在不同工况下两个人工湿地对水产养殖废水中含氮污染物的去除效果和影响因素,并通过对微生物活性、代谢能力及细菌群落结构组成的研究阐明人工湿地构型对含氮污染物去除的差异,并进一步考察两个人工湿

地对水产养殖常用抗生素的去除效果及影响因素,以期为人工湿地技术应用于水产养殖废水特征污染物的去除提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 人工湿地试验装置

水平潜流和下行-上行复合垂直流人工湿地的结构分别如图 1、图 2 所示。装置均由 PVC 材料制成,装置中种植了芦苇 (*Phragmites australis*),种植密度为 50 株·m⁻²。

水平潜流人工湿地装置(HF)的规格为 1.5 m × 0.4 m × 0.8 m。装置两端用穿孔板隔开,形成 0.15 m 的布水区和集水区,布水区和集水区内填充有 0.4 m 高的砾石(粒径 30 ~ 50 mm),并在填料区的前端和后端各铺设 0.1 m 的砾石(粒径 15 ~ 30 mm),有效水深为 0.6 m。主填料区依次为碎石(粒径 5 ~ 10 mm)和沸石(粒径 5 ~ 15 mm),填充比例为 3:1。

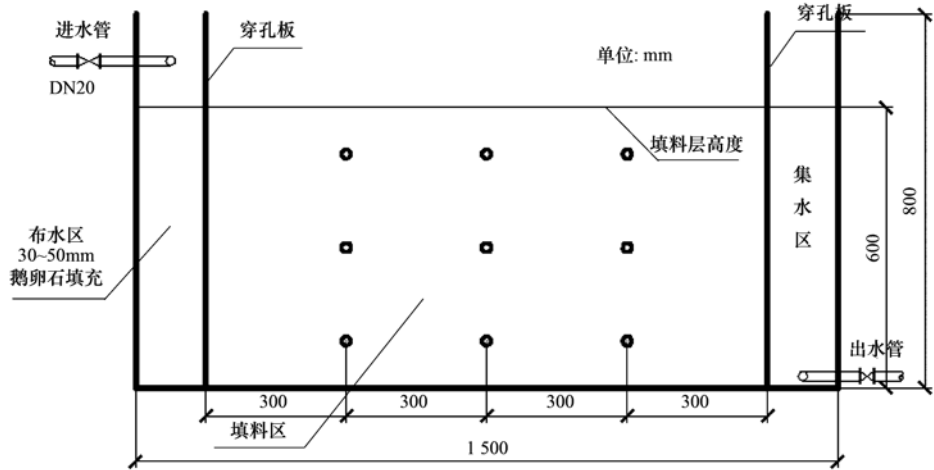


图 1 水平潜流人工湿地结构

Fig. 1 Structure of horizontal subsurface flow constructed wetland

复合垂直流人工湿地装置(IVF)的规格为 1.0 m × 0.6 m × 1.0 m。装置中间加装一层隔板,并在下层固定穿孔承托层,进水通过布水管均匀布水,经过下行和上行后,由集水管收集入集水槽中,有效水深为 0.8 m。在装置的最底层铺设 0.1 m 高的砾石(粒径 15 ~ 30 mm),下行段从下往上依次铺设填充比例为 1:3 的沸石(粒径 5 ~ 15 mm)和碎石(粒径 5 ~ 10 mm)。上行段从下往上依次填充碎石(粒径 5 ~ 10 mm)和沸石(粒径 5 ~ 15 mm),填充比例为 1:3。

1.2 进水水质与装置运行

人工湿地进水取自某水产养殖场的生产河道,进水水质如表 1 所示。两个装置并联运行,进水量由蠕动泵控制,全天 24 h 连续运行。在人工湿地系

统稳定运行之后于 2014 年 3 月 ~ 9 月进行试验,初设的水力停留时间为 1 d,然后通过进水量的改变控

表 1 试验进水水质

Table 1 Water quality of the influent		
项目	范围	平均值
pH	7.25 ~ 8.47	7.87
温度/℃	7.8 ~ 29.4	22.6
电导率/μS·cm ⁻¹	414 ~ 618	487
溶解氧/mg·L ⁻¹	2.5 ~ 5.3	3.7
COD/mg·L ⁻¹	40 ~ 92	61
TP/mg·L ⁻¹	0.142 ~ 0.485	0.252
TN/mg·L ⁻¹	2.674 ~ 3.935	3.132
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	0.892 ~ 1.800	1.257
NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	0.213 ~ 1.283	0.798
NO ₂ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	0.043 ~ 0.169	0.096

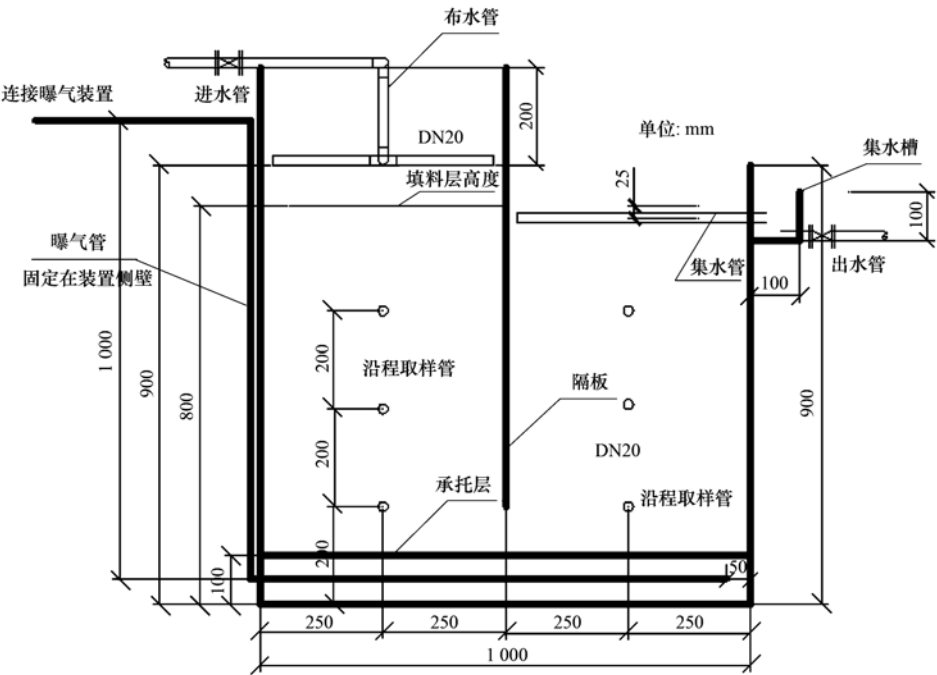


图2 复合垂直流人工湿地结构

Fig. 2 Structure of integrated vertical flow constructed wetland

制水力停留时间和水力负荷,根据不同的工况可将试验分为4个阶段,各阶段的运行参数如表2所示,每阶段进行试验前均设有5~8 d的过渡期以确保人工湿地稳定运行.

1.3 分析方法

1.3.1 常规指标分析

试验过程中,常规水质分析项目包括温度、电导率、DO、pH、TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和NO₂⁻-N. 温度和电导率采用电导率仪测定(上海雷磁),DO采用溶解氧仪测定(上海雷磁),pH采用酸度计测定(美国Fisher Scientific),其他指标均参照《水和废水监测分析方法》中的标准分析方法测定.

1.3.2 微生物分析

当两个人工湿地运行稳定并维持水力停留时间为4 d一段时间后,分别在水平潜流人工湿地装置中的上层前部基质和复合垂直流人工湿地下行流的上层基质采样,采样位点在图1、图2中有所示意,每组样品均由宽度方向上多位点采集的基质均匀混

合而成. 采样后对基质中微生物的代谢特性与多样性及其中细菌的数量和结构组成进行分析.

微生物代谢特性与多样性:采样后,拣出植物根系和杂质,取40 g加入经高压灭菌后的含100 mL生理盐水的250 mL三角锥形瓶中,置摇床上以200 r·min⁻¹速度振荡30 min,然后取20 mL悬液离心(1 500 r·min⁻¹,8 min,20℃)以去除悬浮物对光密度测定的干扰. 用移液器取上清液接种于BIOLOG ECO Plate™微平板中,每孔150 μL. 密封后放置在与采样日平均温度相同的30℃培养箱内,每个样品作3个重复. 分别在12、48、72、96、120、144、168、192和216 h利用多功能酶标仪(Bio-Tek Synergy 4,美国)在590 nm的波长下进行数据采集. 采集后,参照文献[15]计算单孔平均光密度(Average Well Color Development, AWCD),并根据多样性公式分别计算Shannon指数、McIntosh指数和Simpson指数.

细菌数量和结构组成:采用Real-timePCR法检

表2 运行参数

Table 2 Operating parameters

阶段	运行时间/d	HRT/d	水力负荷/(m ³ ·(m ² ·d) ⁻¹)	HF 流量/(L·d ⁻¹)	IVF 流量/(L·d ⁻¹)
I	1~43	1	0.252	151.2	201.6
II	44~67	2	0.126	75.6	100.8
III	68~112	3	0.084	50.4	67.2
IV	113~199	4	0.063	37.8	50.4

测样本中细菌的 16S 基因绝对含量. 定量 PCR 试剂为: ABI Prower SybrGreen qPCR Master Mix (2X); 定量 PCR 仪为: ABI7500 型荧光定量 PCR 仪; 细菌定量分析的引物对为: Eub338-Eub518; RT-PCR 反应参数为: $1 \times (10 \text{ minutes at } 95^{\circ}\text{C})$; $40 \times (15 \text{ seconds at } 95^{\circ}\text{C}; 60 \text{ seconds at } 60^{\circ}\text{C})$. 对人工湿地中细菌群落结构分析中的 Miseq 高通量测序部分委托美吉生物科技有限公司完成.

1.3.3 抗生素分析

在水力停留时间为 1~3 d 的运行阶段内, 对两个人工湿地进出水中的 3 种抗生素(恩诺沙星、磺胺甲噁唑、氟甲砜霉素)进行测定. 各抗生素浓度的测试方法见文献[16, 17], 采用固相萃取-高效液相色谱串联质谱法(SPE-HPLC-MS/MS). 实验试剂: 绘制标线所用标准品均购自阿拉丁试剂(上海)有限公司, 纯度 99%; 有机试剂均为 HPLC 级; 试验用水均为超纯水(Millipore). 分析仪器: TSQ Quantum 液相色谱-串联质谱仪(美国 Thermo Fisher Scientific); 12 管防交叉固相萃取装置(美国 Supelco)等.

取 500 mL 水样通过 $0.45 \mu\text{m}$ 水相滤膜除去悬浮物, 加入 5 mL Na_2EDTA ($50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 络合水样里面的重金属离子, 用盐酸调节水样 pH 至 3.0, 然后用 Oasis HLB SPE ($500 \text{ mg} \cdot 6 \text{ mL}^{-1}$, 美国 Waters 公司)

小柱进行固相萃取富集. 上样前, SPE 柱依次用 6 mL 甲醇和 6 mL 超纯水进行活化平衡; 然后水样以流速 $5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 负压抽滤通过 SPE 小柱; 上样后, 用 6 mL 5% 甲醇水溶液淋洗 SPE 柱, 然后在负压下抽干 30 min; 用 6 mL 甲醇洗脱, 洗脱液收集于试管中, 在 35°C 下用氮气吹干; 然后, 用甲醇: 水 (3: 2, 体积比) 定容至 1.0 mL, 经 $0.22 \mu\text{m}$ 的针头式滤器过滤后保存于 2 mL 棕色小瓶内, 通过 HPLC-MS/MS 进行定量分析, 色谱和质谱的分析条件见文献[17].

1.4 数据分析

本研究中数据整理统计和图表绘制分别采用 Microsoft Excel 2010 和 Origin 9.0 软件进行.

2 结果与讨论

2.1 人工湿地构型对含氮污染物去除的影响

两个人工湿地对各类含氮污染物均有一定的去除效果, 人工湿地对污染物的去除效果随停留时间的变化呈现出波动. 水平潜流和复合垂直流人工湿地在各阶段内对各类含氮污染物的去除效果如图 3 所示, 从中可以发现人工湿地的构型对含氮污染物的去除效果具有较为明显的差异.

在总氮去除方面, 当水力停留时间为 2 d 时, 两个人工湿地的去除率均有下降, 而当水力停留时间

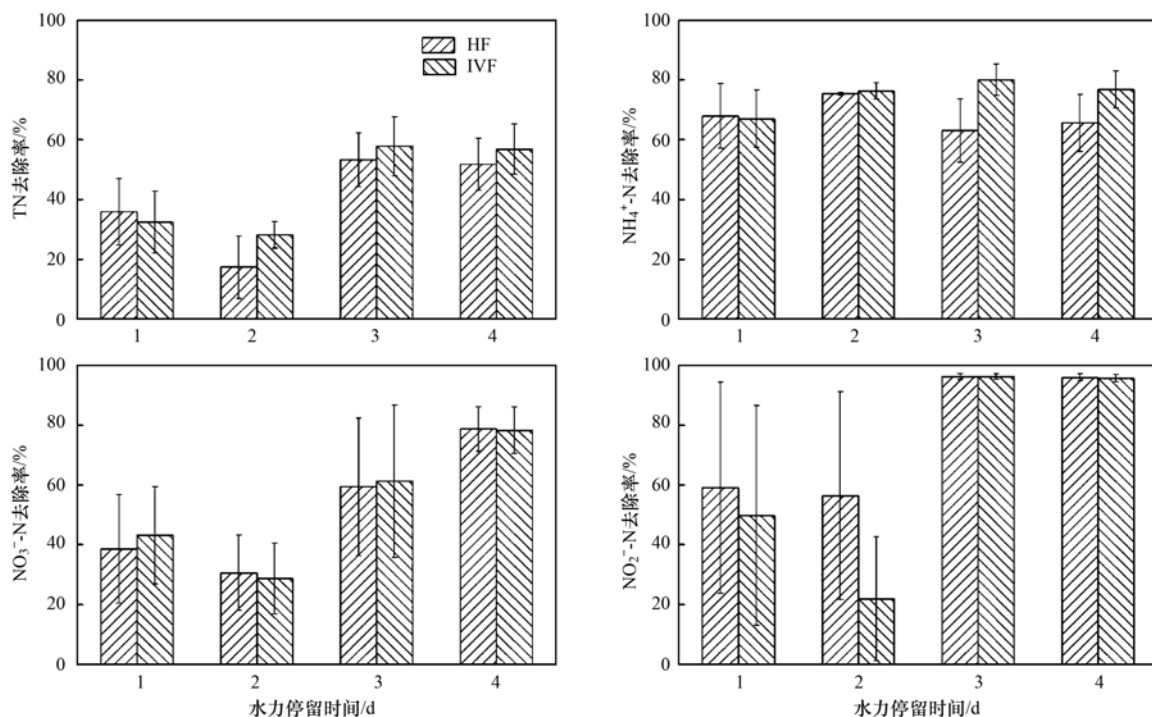


图3 两个人工湿地对含氮污染物的去除效果

Fig. 3 Removal rates of nitrogen pollutants in two constructed wetlands

延长至 3 d 及更高时,两个人工湿地对 TN 的去除率均显著提升($P < 0.05$),且去除率保持相对稳定的水平. 两个人工湿地在水力停留时间为 3 d 时去除效果最好,去除率可分别达到 53% 和 58%,且去除效果较为稳定,这与 Wu 等^[18]设置水力停留时间为 2.4 d 的试验结果相似. 总的来说,复合垂直流对 TN 的去除率均高于水平潜流人工湿地,说明复合垂直流人工湿地的构型可以对 TN 的去除产生影响.

在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除方面,两个潜流人工湿地对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率均高于 60%,当水力停留时间维持在 3 d 及以上时,复合垂直流人工湿地对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率显著高于水平流($P < 0.05$),在水力停留时间为 3 d 时复合垂直流人工湿地的去除率最高可达到 80%. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 主要通过微生物的硝化作用去除^[19],与人工湿地内部的溶解氧浓度具有较大关系. 当水力停留时间维持在 3 d 及以上时,水平潜流人工湿地内部的复氧条件相对不足,去除率有所降低,复合垂直流人工湿地内部则能够通过水流方式提高与氧的混合,较好地供氧能够促进微生物硝化反应的进行^[11],从而促进了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除.

在 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 去除方面,两个人工湿地的去除率差异不大. 当水力停留时间为 4 d 时,两个人工湿地的去除率均在 75% 以上,且较为稳定;水力停留时间降低时,两个人工湿地去除率均显著降低($P < 0.05$),并且在水力停留时间为 2 d 达到最低. 由于硝化、反硝化作用的速率有限,随着水力停留时间的减少, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除量明显降低. 不同构型的人工湿地在高水力停留时间的工况下对 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的去除效果均较好,水力停留时间为 3 d 及以上时,亚硝态氮去除率均大于 95%.

2.2 人工湿地构型对湿地系统内微生物的影响

2.2.1 人工湿地构型对微生物碳源代谢特性及多样性的影响

AWCD 值反映了微生物群落对不同碳源代谢的总体情况,其变化速率反映了微生物的代谢活性. 水平潜流人工湿地上层前部与复合垂直流人工湿地上层基质不同时间的 AWCD 值如图 4 所示. 在这两个不同构型的人工湿地中,复合垂直流对碳源的利用程度高于水平潜流,微生物群落代谢功能的差异可能与不同构型湿地中溶解氧浓度和污染物内部降解规律有关.

为研究两个人工湿地上层前部基质微生物群落功能多样性,选择 96 h 作为取样时间点,根据多样性公式分别计算 Shannon 指数、McIntosh 指数和

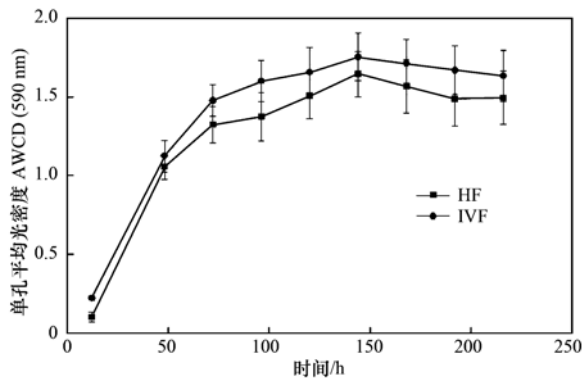


图 4 两个人工湿地基质样品 AWCD 值随时间的变化
Fig. 4 Variation of AWCD in two samples from different CWs over time

Simpson 指数. 如表 3 所示,复合垂直流的各项指数均略高于水平潜流人工湿地,两者之间并没有显著差异($P > 0.05$). 人工湿地上层的复氧条件较好,同时进水端污染物浓度较高,微生物表现出较高的代谢程度^[20]. 在本研究中两个不同构型的人工湿地微生物的表现相当,说明构型对入流端基质微生物的代谢及多样性的影响不大.

表 3 两个人工湿地基质样品中微生物多样性指数¹⁾

Table 3 Diversity indices of two samples from different CWs

人工湿地	Shannon 指数 (H')	McIntosh 指数 (U)	Simpson 指数 ($1/D$)
HF	3.31 ± 0.020 2	8.68 ± 0.793 6	20.66 ± 1.916 1
IVF	3.34 ± 0.011 5	9.87 ± 0.810 4	21.34 ± 0.859 8

1) 数据为平均值 ± 标准差 ($n = 3$)

2.2.2 人工湿地构型对细菌数量和结构组成的影响

不同构型人工湿地中的水流方式可以影响人工湿地的理化参数并因此影响其基质中微生物生物量的空间分布^[21]. 采用定量 PCR 对两个人工湿地基质样品微生物中的细菌数量进行测试,结果显示水平潜流人工湿地上层前部的基质细菌数量为 1.1×10^6 ,而复合垂直流人工湿地上层基质细菌数量为 6.0×10^6 ,显著高于水平潜流人工湿地($P < 0.05$). 在两种构型中,上层基质细菌的数量通常都是较多的^[22, 23],这说明不同构型的水流方式对入流端基质中的细菌数量产生影响.

采用高通量测序对两个人工湿地基质样品微生物中的细菌进行测试,可进一步分析细菌群落结构组成的差异. 不同样品按照“门”的群落结构如图 5 所示. 在所有的湿地样品中,变形菌门 (Proteobacteria) 的丰度最高,绿弯菌门 (Chloroflexi)、拟杆菌门 (Bacteroidetes)、酸杆菌门 (Acidobacteria)、绿硫细菌 (Chlorobi) 和厚壁菌门

(Firmicutes) 的丰度也较高. 研究中发现变形菌门是主要的门类, 这与人工湿地及活性污泥中均类似^[24], 因为变形菌门包括很多与碳、氮和硫循环中相关的细菌^[25].

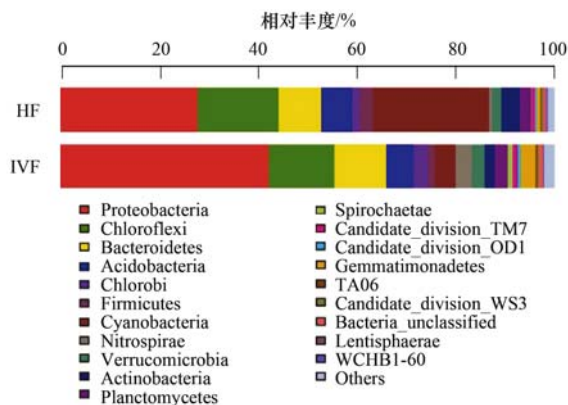


图5 不同样品的群落结构组成(门)

Fig. 5 Bacterial community compositions at phylum level as revealed by pyrosequencing

不同样品按照“属”的群落结构如图6所示, 除无法鉴定的微生物, 比例较高的主要有 *Denitratisoma* 属和 *Nitrospira* 属. *Denitratisoma* 属于变形菌门 β -变形菌纲红环菌目, 其作为一种反硝化细菌主要参与人工湿地中的脱硝过程^[26]. 反硝化过程主要在厌氧条件下进行, 所以 *Denitratisoma* 在两个人工湿地的入流端基质中复合垂直流略高于水平潜流, 而2.1节中水力停留时间为4 d时水平潜流对 NO_3^- -N 的去除率略高, 说明人工湿地系统对

NO_3^- -N 的去除主要发生在后端或下层. *Nitrospira* 属于慢生型菌, 底物亲和力常数较低, 通常在低浓度底物下生长^[27]. 从图6可以看到, *Nitrospira* 在复合垂直流人工湿地上层基质中分布比例相对较多, 未鉴定到属的亚硝化单胞菌科(Nitrosomonadaceae)也有较多分布, 表明硝化作用较好, 这与2.1节中水力停留时间为4 d时复合垂直流对 NH_4^+ -N 的去除有较好的效果一致.

2.3 人工湿地构型对抗生素去除的影响

两个人工湿地对抗生素去除效果如图7所示, 从中可知水产养殖废水进水中恩诺沙星、磺胺甲噁唑和氟甲砜霉素的平均浓度分别为 75.36、98.07 和 556.48 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中氟甲砜霉素的浓度明显高于其他两种抗生素. 人工湿地构型对抗生素的去除效果相差不大, 但不同抗生素的去除效果存在一定的差异: 恩诺沙星的去除率明显大于磺胺甲噁唑和氟甲砜霉素, 氟甲砜霉素的去除效果最差. 水力停留时间对恩诺沙星和氟甲砜霉素的去除无显著影响 ($P > 0.05$), 而对磺胺甲噁唑的影响显著 ($P < 0.05$), 磺胺甲噁唑的去除率随着水力停留时间的增加有明显的升高, 水平潜流人工湿地的去除率从4%升到59%, 复合垂直流人工湿地从3%升到55%.

抗生素在人工湿地中的去除受光解、水解、植物吸附、填料吸附和微生物降解共同作用的影响^[28, 29]. 3种抗生素由于结构不同, 其去除机制存

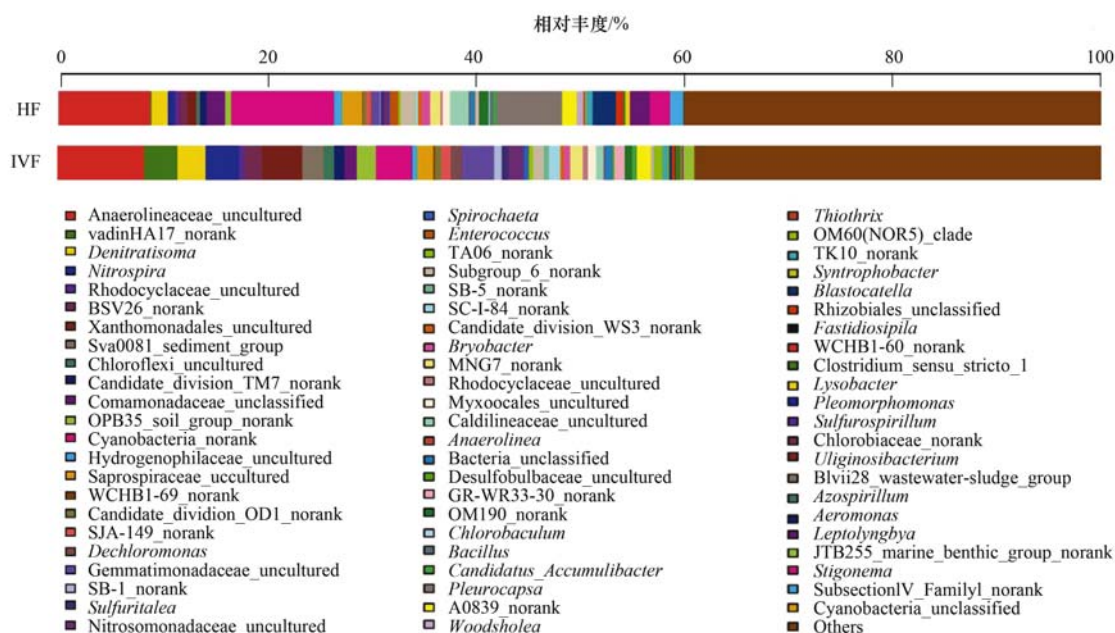


图6 不同样品的群落结构组成(属)

Fig. 6 Bacterial community compositions at genus level as revealed by pyrosequencing

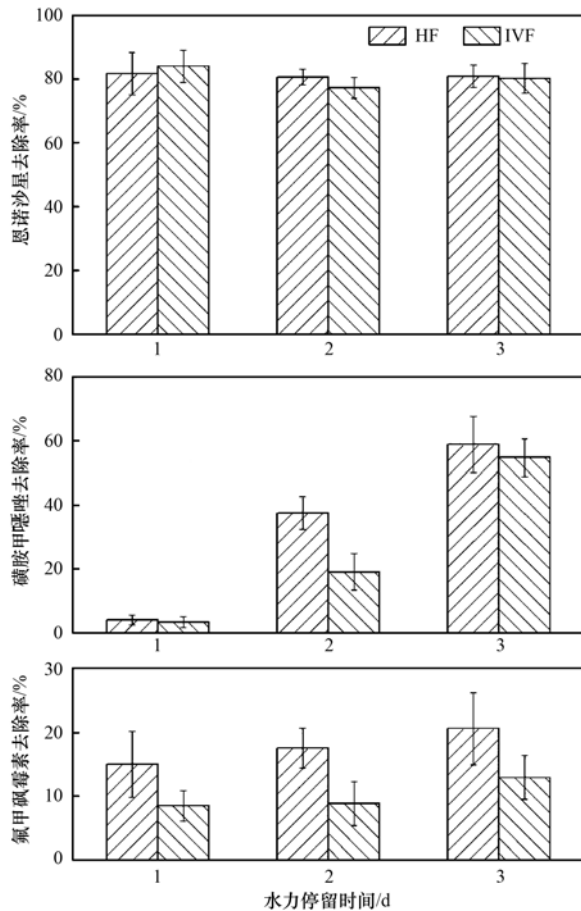


图7 两个人工湿地对3种抗生素的去除效果

Fig. 7 Removal rates of three antibiotics in two constructed wetlands

在一定的差异。恩诺沙星为氟喹诺酮类抗生素,具有喹诺酮类的两个六元环拼合的双环结构并引入了氟原子,易发生光解、易被吸附但不易发生水解^[30, 31],由于潜流人工湿地中光解的作用可以忽略,试验结果表明其去除又与人工湿地构型、水力停留时间无关,说明其在人工湿地中主要通过填料的吸附作用被去除。磺胺甲噁唑为磺胺类抗生素,进入环境后降解较慢。本试验结果中水平流人工湿地相对较差的氧环境更有利于磺胺甲噁唑的去除,说明其在人工湿地中主要的去除途径是厌氧微生物降解,这与钟振兴等^[32]的研究结果一致;同时在人工湿地中水力停留时间延长后,去除率提升,水平潜流人工湿地在水力停留时间为3 d时能够达到50%以上的去除率,与 Hijosa-Valsero 等^[33]的研究结果相似。氟甲砜霉素为氯霉素类抗生素,具有氟、氯多个卤代基团和苯环结构,研究者发现其在太阳光照射下不发生光解^[34],且不易发生水解^[35]。本试验研究表明进水中氟甲砜霉素浓度较高且性质较为稳定,说明氟甲砜霉素在常规人工湿地中难以被去除,

有效的去除方法有待进一步研究。

3 结论

水平潜流人工湿地和下行-上行复合垂直流人工湿地可以去除水产养殖废水中的各类含氮污染物,其中复合垂直流因其水流方式可产生较好的溶解氧条件,基质中上层的微生物活性和多样性均较高,对污染物的去除效果相对较好,水力停留时间为3~4 d时各类污染物的去除效果可达到最优。两种人工湿地对恩诺沙星的去除效果优于磺胺甲噁唑和氟甲砜霉素,水力停留时间的延长有助于提高磺胺甲噁唑的去除率。说明通过改进人工湿地工艺、优化工艺参数可以促进养殖废水中含氮污染物和抗生素的去除。人工湿地对不同种类抗生素的去除机理较为复杂,后续拟通过稳定同位素示踪法、抗性基因检测等手段进一步揭示其机制。

参考文献:

- [1] Cao L, Wang W M, Yang Y, *et al.* Environmental impact of aquaculture and countermeasures to aquaculture pollution in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research-International*, 2007, **14**(7): 452-462.
- [2] Zhang C H, Ning K, Zhang W W, *et al.* Determination and removal of antibiotics in secondary effluent using a horizontal subsurface flow constructed wetland [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2013, **15**(4): 709-714.
- [3] Meng P P, Pei H Y, Hu W R, *et al.* How to increase microbial degradation in constructed wetlands: Influencing factors and improvement measures [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **157**: 316-326.
- [4] García J, Rousseau D P L, Morató J, *et al.* Contaminant removal processes in subsurface-flow constructed wetlands: a review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2010, **40**(7): 561-661.
- [5] Shi Y H, Zhang G Y, Liu J Z, *et al.* Performance of a constructed wetland in treating brackish wastewater from commercial recirculating and super-intensive shrimp growout systems [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(20): 9416-9424.
- [6] 张世羊, 常军军, 高毛林, 等. 曝气对垂直流湿地处理水产养殖废水脱氮的影响 [J]. *农业工程学报*, 2015, **31**(9): 235-241.
- [7] 李怀正, 章星异, 陈卫兵, 等. 高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1597-1603.
- [8] Vymazal J. The use constructed wetlands with horizontal subsurface flow for various types of wastewater [J]. *Ecological Engineering*, 2009, **35**(1): 1-17.
- [9] 吴建强. 潜流、垂直流人工湿地污染物净化效果及耐污染负荷冲击能力研究 [J]. *环境污染与防治*, 2010, **32**(7): 39-43.
- [10] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **380**(1-2): 1-17.

- 3): 48-65.
- [11] Saeed T, Sun G Z. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, **112**: 429-448.
- [12] Dan A, Yang Y, Dai Y N, *et al.* Removal and factors influencing removal of sulfonamides and trimethoprim from domestic sewage in constructed wetlands [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **146**: 363-370.
- [13] Vymazal J. Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(1): 61-69.
- [14] 曹笑笑, 吕宪国, 张仲胜, 等. 人工湿地设计研究进展[J]. *湿地科学*, 2013, **11**(1): 121-128.
- [15] Deng H H, Ge L Y, Xu T, *et al.* Analysis of the metabolic utilization of carbon sources and potential functional diversity of the bacterial community in lab-scale horizontal subsurface-flow constructed wetlands [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2011, **40**(6): 1730-1736.
- [16] Luo Y, Xu L, Rysz M, *et al.* Occurrence and Transport of Tetracycline, Sulfonamide, Quinolone, and Macrolide Antibiotics in the Haihe River Basin, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(5): 1827-1833.
- [17] 黄翔峰, 王坤, 陈国鑫, 等. 人工湿地对水产养殖废水典型污染物的去除[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(1): 12-20.
- [18] Wu S Q, Chang J J, Dai Y R, *et al.* Treatment performance and microorganism community structure of integrated vertical-flow constructed wetland plots for domestic wastewater [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(6): 3789-3798.
- [19] Sims A, Gajaraj S, Hu Z Q. Seasonal population changes of ammonia-oxidizing organisms and their relationship to water quality in a constructed wetland [J]. *Ecological Engineering*, 2012, **40**: 100-107.
- [20] 赵艳, 李锋民, 王昊云, 等. 不同结构好氧/厌氧潜流人工湿地微生物群落代谢特性[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(2): 299-307.
- [21] Hijosa-Valsero M, Matamoros V, Sidrach-Cardona R, *et al.* Comprehensive assessment of the design configuration of constructed wetlands for the removal of pharmaceuticals and personal care products from urban wastewaters [J]. *Water Research*, 2010, **44**(12): 3669-3678.
- [22] 杜刚, 黄磊, 高旭, 等. 人工湿地中微生物数量与污染物去除的关系[J]. *湿地科学*, 2013, **11**(1): 13-20.
- [23] Chang J J, Wu S Q, Liang K, *et al.* Responses of microbial abundance and enzyme activity in integrated vertical-flow constructed wetlands for domestic and secondary wastewater[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, **56**(8): 2082-2091.
- [24] Zhong F, Wu J, Dai Y R, *et al.* Bacterial community analysis by PCR-DGGE and 454-pyrosequencing of horizontal subsurface flow constructed wetlands with front aeration [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, **99**(3): 1499-1512.
- [25] Ansola G, Arroyo P, de Miera L E S. Characterisation of the soil bacterial community structure and composition of natural and constructed wetlands [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **473-474**: 63-71.
- [26] Guo Y H, Gong H L, Guo X Y. Rhizosphere bacterial community of *Typha angustifolia* L. and water quality in a river wetland supplied with reclaimed water[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, **99**(6): 2883-2893.
- [27] Jubany I, Lafuente J, Baeza J A, *et al.* Total and stable washout of nitrite oxidizing bacteria from a nitrifying continuous activated sludge system using automatic control based on Oxygen Uptake Rate measurements[J]. *Water Research*, 2009, **43**(11): 2761-2772.
- [28] Matamoros V, Arias C, Brix H, *et al.* Removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) from urban wastewater in a pilot vertical flow constructed wetland and a sand filter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(23): 8171-8177.
- [29] 罗玉, 黄斌, 金玉, 等. 污水中抗生素的处理方法研究进展[J]. *化工进展*, 2014, **33**(9): 2471-2477.
- [30] Paul T, Miller P L, Strathmann T J. Visible-light-mediated TiO₂ photocatalysis of fluoroquinolone antibacterial agents [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(13): 4720-4727.
- [31] Conkle J L, Lattao C, White J R, *et al.* Competitive sorption and desorption behavior for three fluoroquinolone antibiotics in a wastewater treatment wetland soil[J]. *Chemosphere*, 2010, **80**(11): 1353-1359.
- [32] 钟振兴, 张远, 徐建, 等. 磺胺甲恶唑在沉积物中的降解行为研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(4): 819-825.
- [33] Hijosa-Valsero M, Fink G, Schlüsener M P, *et al.* Removal of antibiotics from urban wastewater by constructed wetland optimization[J]. *Chemosphere*, 2011, **83**(5): 713-719.
- [34] Ge L K, Chen J W, Qiao X L, *et al.* Light-source-dependent effects of main water constituents on photodegradation of phenicol antibiotics: mechanism and kinetics[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(9): 3101-3107.
- [35] Liao P, Zhan Z Y, Dai J, *et al.* Adsorption of tetracycline and chloramphenicol in aqueous solutions by bamboo charcoal: a batch and fixed-bed column study [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **228**: 496-505.

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation of Haze Pollution over China from 1960 to 2013	FU Chuan-bo, TANG Jia-xiang, DAN Li, <i>et al.</i> (3237)
Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Aerosol Particles in Taiyuan, Shanxi	WANG Lu, WEN Tian-xue, MIAO Hong-yan, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions During a Typical Haze Pollution in the Autumn in Shijiazhuang	LIU Jing-yun, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3258)
Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing	WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, <i>et al.</i> (3268)
Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (3280)
Characteristics of Speciated Atmospheric Mercury in Chongming Island, Shanghai	LI Shu, GAO Wei, WANG Shu-xiao, <i>et al.</i> (3290)
Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir	WANG Yong-min, ZHAO Zheng, SUN Tao, <i>et al.</i> (3300)
Variation Characteristics and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Changbai Mountain Station	WU Fang-kun, SUN Jie, YU Ye, <i>et al.</i> (3308)
Characterization of Particle Size Distributions of the No-organized Lead Emission for a Lead and Zinc Smelter	LIU Da-jun, WANG Jia-quan (3315)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains	JIA Wen-xiong, LI Zong-xing (3322)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing-Yichang Section)	GUO Wei, YIN Shu-hua, XU Jian-xin, <i>et al.</i> (3333)
Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors	CHE Fei-fei, WANG Da-peng, ZHEN Zhuo, <i>et al.</i> (3340)
Spatial, Temporal Distribution Characteristics and Potential Risk of PPCPs in Surface Sediments from Taihu Lake	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3348)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in the Karst Groundwater System	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3356)
Comparison on the Hydrogeochemical Characteristics of Typical Karst Groundwater System in Southwest China, a Case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing	ZHAN Zhao-jun, CHEN Feng, YANG Ping-heng, <i>et al.</i> (3365)
Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply	LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, <i>et al.</i> (3375)
Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release	LI Le, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (3384)
Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (3394)
Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water	ZHANG Si-min, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3402)
Assessment of Ecosystem Health of Baogang Tailings Groundwater Based on Microbiome Index of Biotic Integrity (M-IBI)	AN Xin-li, CHEN Ting-ting, ZHAO Han, <i>et al.</i> (3413)
Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir	WANG Zu-wei, WANG Yi-wei, HOU Ying-ying, <i>et al.</i> (3423)
Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater	LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, <i>et al.</i> (3430)
Effects of a Symbiotic Bacterium on the Accumulation and Transformation of Arsenate by <i>Chlorella salina</i>	XU Ping-ping, LIU Cong, WANG Ya, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Nitrate in Water on the Growth of <i>Iris pseudacorus</i> L. and Its Adsorption Capacity of Nitrogen in a Simulated Experiment	WANG Bing, WEN Fen-xiang, XIAO Bo (3447)
Adsorption Behavior of <i>p</i> -hydroxy Biphenyl onto Sediment of the Yellow River in Lanzhou	ZHOU Qi, JIANG Yu-feng, SUN Hang, <i>et al.</i> (3453)
Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process	YIN Zi-hua, SHENG Xiao-lin, LIU Rui, <i>et al.</i> (3460)
Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource	WU Yu-chao, CHEN Li-jun, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3466)
Reaction Kinetics and Impacting Mechanism of Cr(VI) Removal in Fe ⁰ -PRB Systems	LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i> (3473)
Adsorption Cd ²⁺ from Solution by EDTA-modified Silicate Nanoparticles	JIANG Shun-cheng, QIN Rui, LI Man-lin, <i>et al.</i> (3480)
Analysis and Characterization of Multi-modified Anodes via Nitric Acid and PPY/AQDS in Microbial Fuel Cells	SHEN Wei-hang, ZHU Neng-wu, YIN Fu-hua, <i>et al.</i> (3488)
Adsorption Characteristics of Phosphorus Wastewater on the Synthetic Ferrihydrite	CUI Meng-meng, WANG Dian-sheng, HUANG Tian-yan, <i>et al.</i> (3498)
Performance of Bio-zeolite Constructed Wetland in Dispersed Swine Wastewater Treatment	MOU Rui, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3508)
Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis by Glycerol-based Mixed Culture and Its Relation with Oxygen Uptake Rate (OUR)	LIU Dong, ZHANG Xiao-ting, ZHANG Dai-jun, <i>et al.</i> (3518)
Kinetics and Mechanistic Investigation of the Photocatalytic Degradation of Clothianidin	HU Qian, YANG Hai, SHI Ni, <i>et al.</i> (3524)
Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (3532)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China	DONG Jie, HUANG Ying, LI Yong-xia, <i>et al.</i> (3540)
Vertical Distribution of Heavy Metals and Its Response to Organic Carbon in Red Soil Profile	JIA Guang-mei, MA Ling-ling, XU Dian-dou, <i>et al.</i> (3547)
Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice	GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3554)
Effect of Modified Biochars on Soil Cadmium Stabilization in Paddy Soil Suffered from Original or Exogenous Contamination	YANG Lan, LI Bing, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3562)
Performance of Bioleaching Combined with Fenton-like Reaction in Heavy Metals Removal from Contaminated Soil	ZHOU Pu-xiong, YAN Xie, YU Zhen, <i>et al.</i> (3575)
Effect of Long-term Oil Contamination on the Microbial Molecular Ecological Networks in Saline-alkali soils	ZHAO Hui-hui, XIAO Xian, PEI Meng, <i>et al.</i> (3582)
Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui (3590)
Fungal Community Structure of Different Degeneration <i>Deyeuxia angustifolia</i> Wetlands in Sanjiang Plain	SUI Xin, ZHANG Rong-tao, XU Nan, <i>et al.</i> (3598)
Short-term Effects of Nitrogen and Sulfate Addition on CH ₄ and CO ₂ Emissions in the Tidal Marsh of Min River Estuary	HU Min-jie, REN Peng, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (3606)
Variation of Soil CO ₂ Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment	DU Lan-lan, WANG Zhi-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (3616)
Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jinci Region of Taiyuan City	YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, <i>et al.</i> (3625)
Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil	WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3634)
Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of <i>Populus cathayana</i>	XIN Yue, SHANG Bo, CHEN Xing-ling, <i>et al.</i> (3642)
Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin	LI Hong-jian, YANG Yan, YAN Jun-xia (3650)
Composition and Evolution Characteristics of Dissolved Organic Matter During Composting Process	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3660)
Effects of Acidic and Basic Modification on Activated Carbon for Adsorption of Toluene	LIU Han-bing, YANG Bing, XUE Nan-dong (3670)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行